

УДК 621.373.826.089.68

Є. П. Тимофеев, канд. техн. наук
 ННЦ "Інститут метрології"
 вул. Мироносицька, 42, м. Харків,
 61002

тел.: (057) 704-97-50,

факс (057) 700-34-47

E-mail: timofeev@metrology.kharkov.ua

ДЕРЖАВНИЙ ПЕРВИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦЬ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ І ЕНЕРГІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Введення

У даний час розроблені і випускаються лазерні комплекси, що дозволяють отримати стабільне монохроматичне оптичне випромінювання в будь-якій точці спектрального діапазону 275 - 1100 нм [1, 2]. Отже, можна стверджувати про наявність можливості заміни світлових еталонних випромінювачів лазерними джерелами і це дуже важливо, особливо при проведенні прецизійних вимірювань у світлотехніці. Тут досить актуально нагадування про прийняте останнє визначення кандели, яке було уточнене у 2009 році консультативним комітетом радіометрії та фотометрії (ККРФ), де сказано, що Кандела - одиниця сили світла в заданому напрямку, така, що світлова ефективність монохроматичного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц дорівнює точно 683 кандел стерадіан на ват [3]. Отже, точне вимірювання енергетичних характеристик монохроматичного лазерного випромінювання стає все більш актуальним і для світлотехніки.

В Україні з 1997 року діє ДСТУ 3539-97 "Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм", що регламентує процедури повірки та калібрування засобів вимірювань енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які використовуються в Україні. Дану повірочну схему очолює державний первинний еталон середньої потужності та енергії лазерного випромінювання, введений у 1997 році до державного реєстру під шифром ДЕТУ 11-04-97 [4, 5].

Технічні характеристики еталона в той час перебували на рівні закордонних аналогів. Протягом багатьох років регулярно проводилися роботи з дослідження характеристик державного первинного еталона, які підтвердили його основні метрологічні характеристики [6 - 8].

Однак, враховуючи метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки, що постійно удосконалюються, існуючі світові тенденції щодо постійного поліпшення точносних характеристик еталонів, а також аналіз результатів експлуатації еталона за багаторічний період, слід підкреслити, що в даний час виникла необхідність розробки нового алгоритму роботи еталона з метою підвищення його метрологічних характеристик і істотного розширення робочого діапазону відтворюваних еталоном енергетичних величин [9].

Мета проведеної роботи полягає в поліпшенні метрологічних характеристик державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного

випромінювання за рахунок розробки нової структури і нового алгоритму роботи еталона.

Нова структура державного первинного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання.

У Росії єдність вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання регламентовано державною повірочною схемою ГОСТ 8.275-2007. Державну повірочну схему очолює державний первинний еталон одиниці потужності безперервного лазерного випромінювання, що розроблений, експлуатований і зберігається у ФГУП "ВНДІОФІ", він функціонує в двох режимах - «послідовному» і «паралельному» [10, 11]. При послідовному способі еталонний первинний вимірювальний перетворювач (ЕПВП) при передачі одиниці замінюється вивіренним первинним вимірювальним перетворювачем (ПВП). Паралельний спосіб передбачає одночасну подачу оптичної потужності в еталонний вимірювальний перетворювач і у вимірювальний перетворювач, що калібрують, з використанням дільника оптичної потужності. Використання двох режимів роботи еталона викликано тим, що кожен з них має свої переваги і свої непереборні недоліки, тобто немає явних переваг одного способу перед іншим.

Раніше державний первинний еталон середньої потужності та енергії лазерного випромінювання Україні також використовував або послідовний, або паралельний режим роботи при передачі розміру збереженої одиниці [4, 7].

Для поліпшення метрологічних характеристик державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного випромінювання України нами запропонована нова структура і, відповідно, новий алгоритм роботи еталона.

Основна відмінність нової побудови структури еталона від відомих аналогів полягає в тому, що ми застосували «паралельно-послідовний» метод відтворення та передачі одиниці середньої потужності лазерного випромінювання. Для реалізації такої побудови у складі еталона необхідно мати кілька ЕПВП (бажано на різні діапазони вимірювання відтворюваної одиниці), включених паралельно, а при передачі одиниці один з ЕПВП послідовно замінюється ПВП, що звіряється. Природно, для цього також необхідно мати багатопроменевий ослаблювач або багатоканальний дільник, що дозволяє проводити паралельне підключення ЕПВП.

Спрощена структурна схема еталону, що реалізує паралельно-послідовний метод, з використанням трьох ЕПВП представлена на рис. 1.

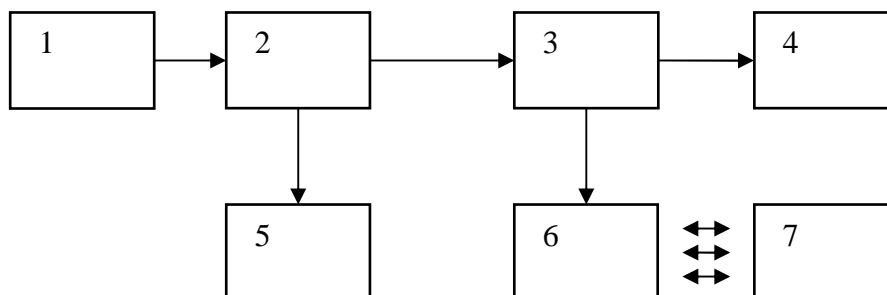


Рис. 1 - Спрощена структурна схема еталону, що реалізує паралельно-послідовний метод
 1 - стабілізовані по потужності лазерні випромінювачі; 2 - ділильна пластина - відгалужувач,
 3 - багатопроменевий ослаблювач, 4 - ЕПВП № 1, 5 - приймач-свідок;
 6 - ЕПВП № 2 або ЕПВП № 3; 7 - ПВП, що звіряється.

Очевидно, що відмінною особливістю запропонованого методу побудови структури еталона є можливість постійного контролю за стабільністю відносних

коефіцієнтів розподілу ділильної пластини для приймальника-свідка і багатопроменевого ослаблювача, дозволяє поєднати переваги «послідовного» і «паралельного» режимів і усунути їх недоліки. Отже, така структура побудови державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного випромінювання дозволяє поліпшити його метрологічні характеристики.

За багатопроменевий ослаблювач у даному випадку можна використовувати оптичний клин, аналогічний використовуваному в національному інституті стандартів і технологій (НІСТ) США для передачі відтворюючої одиниці середньої потужності лазерного випромінювання, див. рис. 2 [12].

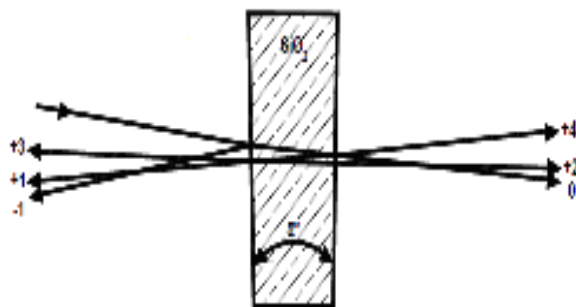


Рис. 2 - Багатопроменевий ослаблювач на основі клина і коефіцієнти ослаблення при куті падіння $= 8,76^\circ$, довжині хвилі 633 нм і вертикальній поляризації випромінювання [12]

Таблиця 1

Напрямок	Ослаблення
0	1.075
-1	26.08
+1	28.52
+2	8.222×10^2
+3	2.379×10^4
+4	6.864×10^5

Нами в якості багатопроменевого ослаблювача використаний блок еталонних ослаблювачів, створений на етапі початкової розробки державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного випромінювання України [4, 18]. Конструктивно блок еталонних ослаблювачів складається з набору світлоподільних пластин, які призначені для ослаблення і розподілу випромінювання у процесі відтворення одиниці середньої потужності та енергії лазерного випромінювання, і компенсаційних пластин, які призначені для компенсації просторового зміщення центру лазерного променя при зміні коефіцієнта ослаблення. До складу блоку еталонних ослаблювачів також входять рухливі діафрагми, що дозволяють вибирати потрібний коефіцієнт ослаблення. Кут нахилу робочих пластин по відношенню до осі лазерного пучка дискретно змінюється від значення $\alpha_1 = 45^\circ$ до $\alpha_7 = 41^\circ 10'$, чим забезпечується точне попадання відбитого променя в приймач незалежно від встановленого коефіцієнта ослаблення. Структурна схема і зовнішній вигляд блоку еталонних ослаблювачів показані на рис. 3.

У таблиці 2 наведені результати вимірювання коефіцієнта ділення блоку еталонних ослаблювачів K в залежності від кількості послідовно встановлених у робоче положення елементів дільника N . Виміри проводилися для оптичного випромінювання з довжиною хвилі 633 нм.

Таблиця 2

N	1	2	3	4	5	6	7
K	2,385	1,535	0,913	0,172	0,0525	0,0195	0,00905

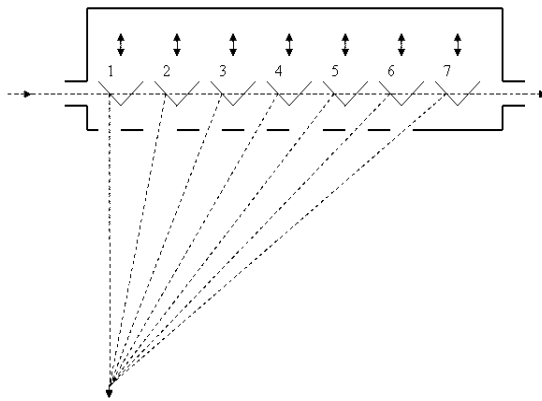


Рис. 3 - Структурна схема і зовнішній вигляд блоку еталонних ослаблювачів.

Необхідно підкреслити, що відмінною особливістю паралельно-послідовного методу передачі одиниці, що зберігається еталоном, є використання декількох (не менше двох) еталонних первинних вимірювальних перетворювачів. При цьому один з ЕПВП має вищі точнісні характеристики, ніж другий, але істотно менший діапазон вимірювань відтворюваної еталоном одиниці. Застосування нової структури побудови еталона і розробленого блоку еталонних ослаблювачів вимагає розробки нових еталонних первинних вимірювальних перетворювачів. Для роботи в різних діапазонах вимірювання відтворюваної одиниці були розроблені різні за конструкціями еталонні первинні вимірювальні перетворювачі. В діапазоні входних потужностей від $2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт до 3,0 Вт використовуються еталонні первинні вимірювальні перетворювачі на базі абсолютного радіометра калориметричного типу [13]. ЕПВП № 1 та № 2 забезпечують необхідні характеристики еталона в діапазоні входних потужностей від $2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт до 3,0 Вт. При цьому ЕПВП № 1 працює в діапазоні входних потужностей від $1,0 \cdot 10^{-1}$ Вт до 1,0 Вт, де має найвищі метрологічні характеристики. При рівнях сигналів нижче $2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт використовується спеціально розроблений ЕПВП № 3 на основі трап-детектора з фотодіодами з 100% внутрішньою квантовою ефективністю [14 - 17].

Конструкція ЕПВП № 1 подана на рис. 4. Вона практично еквівалентна конструкції ЕПВП державного первинного еталона одиниці потужності безперервного лазерного випромінювання Росії [10], принципова відмінність полягає в тому, що нами застосований прецизійний попередній підсилювач вихідного сигналу, вбудований в ЕПВП № 1, і встановлений датчик температури.

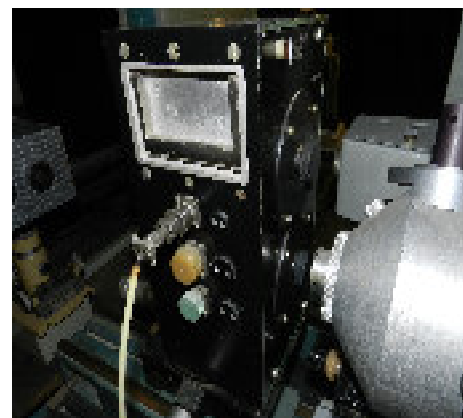
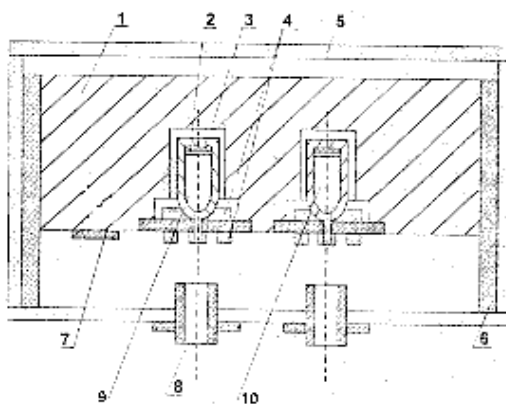


Рис. 4 - Конструкція і зовнішній вигляд еталонного приймача ЕПВП № 1.

1 - пасивний термостат, 2 - приймальна підстава, 3 - обмотка заміщення, 4 - термопари, 5 - корпус, 6-термоізолятор, 7 - терморезистор, 8 - входне вікно. 9 - приймальний елемент, 10 - компенсаційний приймальний елемент.

Конструкція еталонного приймача ЕПВП № 2 докладно описана в патенті [19] і відрізняється від ЕПВП № 1 конструкцією приймального елемента і наявністю багатоканального підсилювача. Пристрій багатоканального приймального елемента ЕПВП № 2 показано на рис. 5.

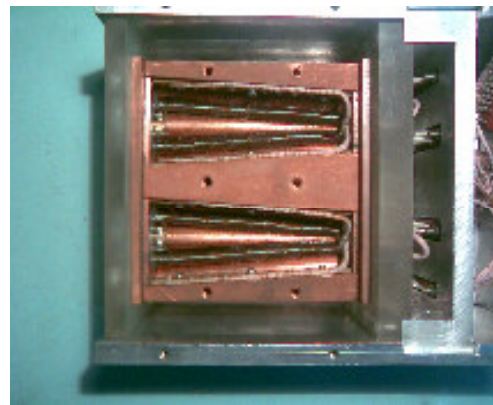
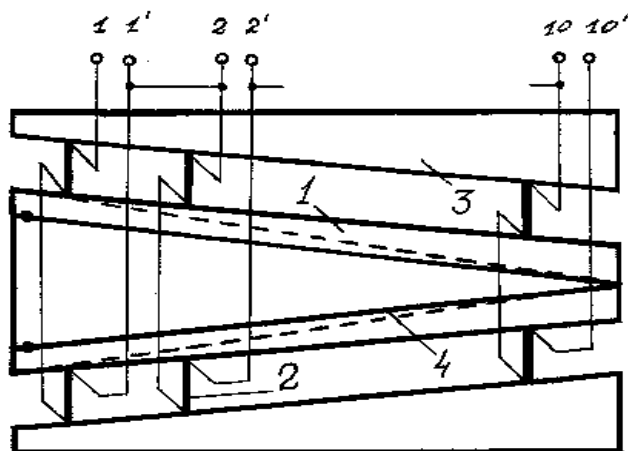


Рис. 5 - Конструкція і зовнішній вигляд приймального елемента ЕПВП № 2.
1 - конусний приймальний елемент; 2 - термопари; 3 - внутрішній корпус;
4 - V-подібний нагрівальний елемент.

Схема побудови трап-детектора з фотодіодами з 100% внутрішньою квантовою ефективністю і зовнішній вигляд розробленого ЕПВП № 3 показано на рис. 6.

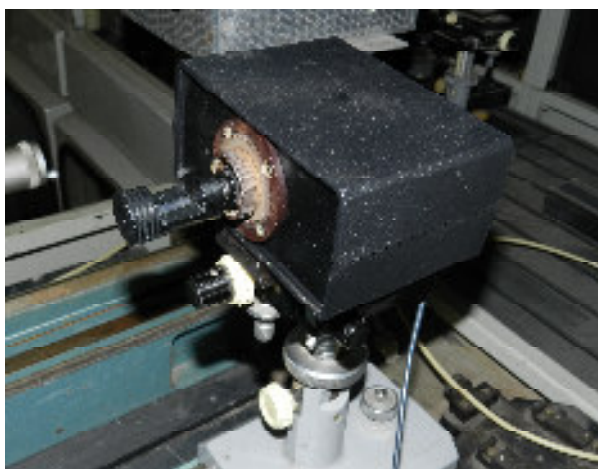
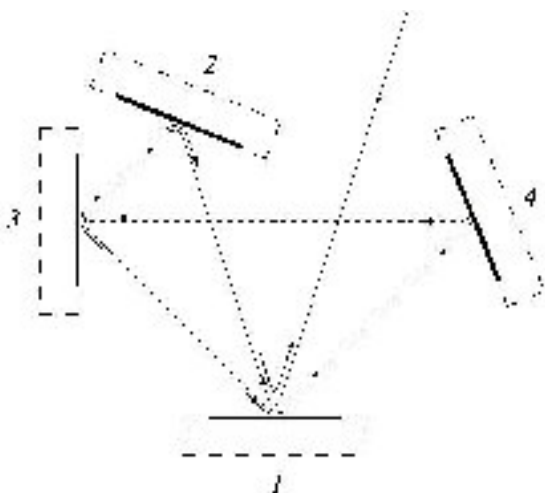


Рис. 6 - Схема побудови трап-детектора і зовнішній вигляд ЕПВП № 3

Крім розробки нової структури еталона був розроблений і відповідний новий алгоритм проведення вимірювань на державному первинному еталоні середньої потужності та енергії лазерного випромінювання.

Структурно-функціональна схема комплексу апаратури еталона з урахуванням внесених змін показана на рис. 7.

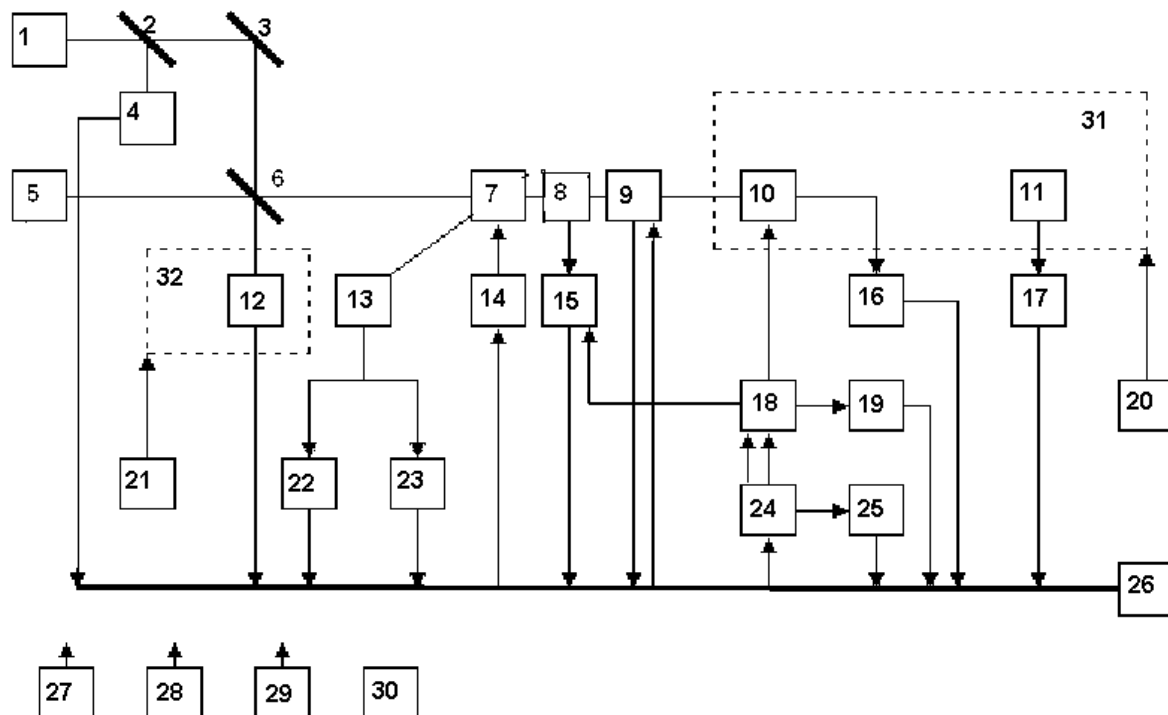


Рис. 7 - Структурно-функціональна схема комплексу апаратури державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного випромінювання України

1 - лазер з довжиною хвилі 10,6 мкм; 2, 3, 6 - оптичні елементи; 4 - приймач-свідок на довжину хвилі 10,6 мкм; 5 - лазери з довжинами хвиль 0,633 мкм і 0,806 мкм; 7 - оптико-механічний затвор; 8 - ослаблювач лазерного випромінювання; 9 - фотометрична сфера з вбудованим фотоприймачем і регульованим ослаблювачем; 10 - еталонний первинний вимірювальний перетворювач ЕПВП № 2; 11 - еталонний первинний вимірювальний перетворювач ЕПВП № 3; 12 - приймач-свідок, 13 - фотоприймач каналу вимірювання тривалості імпульсу; 14 - блок управління затвором; 15 - ЕПВП № 1 з підсилювачем вихідного сигналу; 16 - багатоканальний блок реалізації алгоритму вимірювання; 17 - блок сполучення трап-детектора з комп'ютером, вимірювач вихідного сигналу ЕПВП № 3; 18 - блок еталонних котушок опору; 19 - вимірювач струму калібрування ЕПВП № 1 і № 2; 20 і 21 - терморегулятори; 22 - вимірювач напруги каналу вимірювання тривалості імпульсів; 23 - вимірювач тривалості імпульсів; 24 - блок калібрування ЕПВП № 1 і № 2; 25 - вимірювачі напруги калібрування ЕПВП № 1 і № 2; 26 - комп'ютер; 27 - система електроживлення; 28 - система охолодження; 29 - система контролю параметрів навколишнього середовища; 30 - система кондиціонування; 31 і 32 - термокамери.

Результати дослідження модернізованого еталона показали [6], що державний первинний еталон забезпечує відтворення одиниці середньої потужності лазерного випромінювання з середнім квадратичним відхиленням результату вимірювань $S_{рв}$, що не перевищує значення $0,05 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і $0,15 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт та 3 Вт при 30 незалежних спостереженнях.

Невилучена систематична похибка $\Theta_{рв}$ не перевищує $0,05 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і $0,15 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт і 3 Вт.

Невизначеність вимірювань при відтворенні одиниці середньої потужності безперервного лазерного випромінювання не перевищує:

по типу А – $u_A = 0,05 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і

$u_A = 0,15 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт і 3 Вт

по типу В – $u_B = 0,03 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і

$u_B = 0,08 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт і 3 Вт

Сумарна стандартна невизначеність

$u_C = 0,06 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і

$u_C = 0,17 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт і 3 Вт

Розширена невизначеність

$U = 0,12 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і

$U = 0,34 \cdot 10^{-2}$ для рівня потужності $1 \cdot 10^{-5}$ Вт і 3 Вт з коефіцієнтом охоплення $K=2$ і довірчою ймовірністю $P=0,95$.

Висновки

Уперше запропонований «паралельно-послідовний» метод побудови еталона для відтворення та передачі одиниці середньої потужності лазерного випромінювання з використанням декількох еталонних первинних вимірювальних перетворювачів дозволяє істотно поліпшити метрологічні характеристики еталона.

Проведена на основі запропонованого методу і нового алгоритму модернізація державного первинного еталона середньої потужності та енергії лазерного випромінювання показала зменшення розширеної відносної невизначеності вимірювань при відтворенні енергетичних одиниць лазерного випромінювання до значення, що не перевищує 0,12% для рівня потужності та енергії $1 \cdot 10^{-3}$ Вт і $1 \cdot 10^{-3}$ Дж відповідно.

Розроблена в Україні еталонна база в галузі вимірювання енергетичних характеристик монохроматичного оптичного випромінювання за своїми метрологічними характеристиками знаходиться на рівні еталонів розвинутих зарубіжних країн світу, а за рядом параметрів перевершує їх.

Удосконалений державний первинний еталон одиниць потужності та енергії лазерного випромінювання повністю задовольняє потребам України щодо забезпечення єдності та достовірності оптико-фізичних вимірювань у галузі вимірювань енергетичних параметрів лазерного випромінювання в країні на нинішньому етапі та на найближчу перспективу.

Даний метод побудови структури еталона також можна успішно застосовувати в світлотехніці при передачі енергетичних одиниць, наприклад, люмена.

Список літератури

1. S.Kobtsev, V.Baraulya, V. Lunin. Wide-autoscanned narrow-line tunable system based on CW Ti:Sapphire/Dye laser for high precision experiments in nanophysics. Proc. SPIE, "Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices", 2009, v. 7193, paper 71932S (Photonics West, LASE-2009, 24-29 Jan 2009, San Jose, USA).
2. <http://www.tekhnoscan.ru/russian/index.htm>
3. Consultative Committee for Units (CCU) Report of 19th Meeting 26-28 May 2009.
4. Грищенко Л.В., Соловійов В.С., Тимофеев Є.П. Державний спеціальний еталон одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання //Український метрологічний журнал. – 1998. – В.3. – С.36-41.
5. Тимофеев Е.П. Метрологическое обеспечение в области энергетической лазерометрии //Український метрологічний журнал. – N1. – 2007. – с. 29-33.
6. Тимофеев Е.П. Исследование государственного первичного эталона средней мощности и энергии лазерного излучения //Український метрологічний журнал. – N.3 – 2012. – с. 29-33.
7. Тимофеев Е.П. Разработка и исследование средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения //Український метрологічний журнал. – N2. – 2009. – с. 29-35.
8. Тимофеев Е.П. Методы и средства высокоточного измерения энергетических характеристик волоконных лазеров // Прикладная радиоэлектроника. Том8 – N1. – 2009. – с. 80-85.
9. Грищенко Л.В., Мунтян К.И., Тимофеев Є.П. Удосконалення державного первинного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання //Український метрологічний журнал. – N2. – 2010. – с. 13-17.
10. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Либерман А.А., Овсик Я., Улановский М.В. Фотометрия и радиометрия оптического излучения. [Книга 2. Измерение энергетических и пространственно-

энергетических параметров и характеристик лазерного излучения (энергетическая лазерометрия)] - М.; 212 с, 2000 г

11. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Либерман А.А., Москалюк С. А., Улановский М.В. Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения. - Измерительная техника, №7, 2007 г. -с. 3-6.

12. G. W. Day. Metrology for the Optoelectronics Industry. Proceeding of SPIE, Volume 4450(1) SPIE – Jun 18; 2001.p33-44.

13. Кузьмичев В.М., Соловьев В.С., Зинченко Н.И., Тимофеев Е.П. Снижение погрешности замещения калориметрических измерительных приемников // Український метрологічний журнал. – № 2. – 1997. – с.19-21.

14. Литвиненко А.С., Тимофеев Е.П. Использование трап-детекторов для высокоточных измерений // Світлотехніка та електроенергетика – N1. – 2010. – с. 20-23.

15. Тимофеев Є.П. Метрологічне забезпечення лазерної медичної техніки // Метрологія та прилади. — 2012. — № 1. — С. 54—61.

16. Мунтян К.И., Тимофеев Е.П. Разработка и исследование трап-детектора с высокой внешней квантовой эффективностью // Світлотехніка та електроенергетика – N3. – 2011. – с. 31-38.

17. Балабан В.М., Мунтян К.И., Тимофеев Е. П. Трап-детектор. Патент України №98063 от 10.04.2012. Бюл.№7. 2012р

18. Балабан В.М., Тимофеев Е.П. Оптический делитель для государственного специального эталона единиц средней мощности и энергии когерентного излучения малых уровней // Тези доповідей Української науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» («Метрологія-95»). 10—13 жовтня 1995 року, м. Харків, 1995. — 117 с.

19. Калориметрический измерительный преобразователь: Патент України N 21494 від 7.05.98. Соловьев В.С., Тимофеев Е.П., Кузьмичев В.М., Зинченко Н.И.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. П. Тимофеев

Приведены результаты разработки новой структуры и нового алгоритма работы государственного первичного эталона средней мощности и энергии лазерного излучения

STATE PRIMARY UNITS ETALON AVERAGE POWER AND LASER ENERGY

E. P. Timofeev

The results of the development of a new structure and a new algorithm of the state primary standard of the average power and energy of laser radiation